

*В.Б. ТАРЕЛЬНИК, Г.А. БАКАЙ, В.С. МАРЦИНКОВСКИЙ*

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДНОГО СЛОЯ ИЗ МЕДИ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКИ И ОЛОВА

In article the technique and results of theoretical researches of influence of a transitive layer from copper on durability of its connection with a steel substrate from tin is resulted.

Большинство ответственных деталей и узлов центробежных компрессоров, насосов, турбин и других машин работают при высоких скоростях, нагрузках и температурах, а также в условиях коррозионного, абразивного и других видов воздействия рабочих сред.

Решение проблемы, связанной с увеличением сроков службы машин, напрямую зависит от повышения износостойкости и надежности узлов трения. При большом разнообразии условий работы деталей наиболее нагруженным у них является поверхностный слой. Поэтому реальный ресурс работы машины напрямую зависит от несущей способности поверхностей деталей, которая определяется качеством их поверхностного слоя.

Таким образом, создание поверхностных слоев с особыми свойствами для узлов трения скольжения, в данном случае подшипников скольжения (ПС), является актуальной задачей.

В значительной мере надежность ПС, при прочих равных условиях, зависит от качества его изготовления, а также проведения монтажных и ремонтных работ, выполнения всех требований конструкторской и технологической документации.

Как правило, перед заливкой баббитов поверхность стального вкладыша подшипника (ВП) подвергается лужению. При этом на площадках фактического контакта поверхностей действуют силы молекулярного притяжения, которые проявляются на расстояниях в десятки раз превышающих межатомные в кристаллических решетках, и увеличиваются с повышением температуры. Переходной слой, обуславливающий прочную металлическую связь, при этом отсутствует, что отрицательно влияет на качество заливки баббита, теплопроводность и работоспособность подшипника в целом.

На основании анализа технологии изготовления ВП, изучения условий их работы и причин выхода из строя нами предлагается на стальную подложку перед лужением оловом наносить промежуточный слой из меди. Это обеспечит более прочное сцепление стальной подложки с баббитом, а также более интенсивный отвод тепла из зоны трения.

Существует большое количество различных методов нанесения покрытий из мягких металлов на стальные изделия (гальванический способ, металлизация напылением и др.). Сравнение их достоинств и недостатков позволило обоснованно выделить как наиболее перспективный метод электроэрозионного легирования (ЭЭЛ), обеспечивающий прочное сцепление нанесенного металла с подложкой, что является определяющим в выборе данной технологии. Кроме того, такой недостаток ЭЭЛ, как повышение шероховатости поверхности, применительно к данной технологии будет выступать как достоинство.

Энергия связи атомов металла обусловлена сдвигом энергетических уровней валентных электронов кристалла в сторону уменьшения энергии по сравнению с энергией валентных электронов свободных атомов [1].

Если принять энергию электрона на поверхности кристалла  $E_s = 0$ , то можно представить схему энергии связи в металле посредством указания энергетических уровней электронов (рис. 1), где  $E_s$  – нулевая энергия электрона;  $E_{свб. атом.}$  – энергия основного состояния валентного электрона в свободном атоме (энергия ионизации атома);  $E_m$  – средняя трансляционная энергия электрона в металле;  $E_f$  – уровень Ферми;  $E_a$  – наименьшее состояние валентного электрона при  $k = 0$ , где  $k$  – волновой вектор, абсолютная

величина  $k = \frac{2\pi p}{h}$ , где  $p$  – импульс частицы,  $h$  – постоянная Планка.

Учитывая данные обозначения на рис. 1 можно записать выражение для энергии связи на один атом [2].

$$E_{\text{связи атом}} = E_{\text{свб. атом.}} - E_a + E_m \quad (1)$$

Состояние электронов обозначается энергией  $E_{\text{свб. атом.}}$ , когда атомы находятся на больших расстояниях (парообразное состояние) и взаимодействие между электронами атомов металла равно нулю.

При образовании кристаллов металла атомы сближаются, и электроны вследствие взаимодействия образуют энергетические полосы шириной  $E_f - E_a$ . Образование энергетических полос обусловлено принципом Паули, который запрещает двум электронам (точнее частицам), подчиняющимся статистике Ферми-Дирака, находиться на одном энергетическом уровне.

Таким образом, энергия связи в кристаллическом металле есть энергия, которую нужно затратить, чтобы перевести все электроны с полосы энергии  $E_f - E_a$  на энергетические уровни, которые они занимали до образования кристаллов металла, т. е. на  $E_{\text{свб. атом.}}$ .

Чтобы проанализировать энергию связи атомов в переходе металл-металл, возникающую в соединениях Fe - Sn и Fe - Cu - Sn, полученных

сплавлением, ЭЭЛ и другими способами, необходимо для удобства получить схемы энергетических уровней данных металлов.

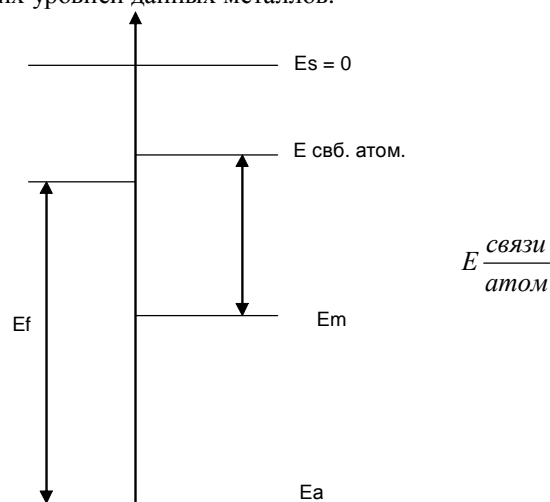


Рис. 1 – Расположение энергетических уровней электронов в металле

Энергия атома металла в свободном состоянии определяется энергией ионизации атома [3], т. е.  $E_{\text{свб. атом.}} = E_i$ .

Ионизационные потенциалы определены для всех химических элементов и приводятся в электрон-вольтах (эВ). Так для Fe, Cu и Sn находим из [4]:

$$E_i(\text{Fe}) = 7,83 \text{ эВ};$$

$$E_i(\text{Cu}) = 7,72 \text{ эВ};$$

$$E_i(\text{Sn}) = 7,30 \text{ эВ}.$$

Чтобы проанализировать изменение энергии связи между атомами в переходах металл-металл, образованных металлами Fe - Sn и Fe - Cu - Sn, располагая энергией ионизации атомов, необходимо также вычислить среднюю трансляционную энергию  $E_m$ , которую можно определить вычислив энергию Ферми  $E_f$ .

Для химических элементов энергию Ферми вычисляем из соотношения [3]:

$$E_f = \frac{\hbar^2}{2m_e} \sqrt[3]{(3\hbar^2)^2} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{N}{V}\right)^2}, \quad (2)$$

где  $\hbar$  - постоянная Планка,  $m_e$  - масса покоя электрона,  $\frac{N}{V}$  - концентрация свободных электронов в кристаллическом металле.

Концентрация электронов  $\frac{N}{V}$  определяется произведением валентности металла на число атомов в  $1 \text{ см}^3$  [3,5].

Концентрация электронов для Fe, Cu, Sn приведена в [3] и равна:

$$\frac{N}{V}(\text{Fe}) = 17,0 \cdot 10^{22} \text{ 1/см}^3;$$

$$\frac{N}{V}(\text{Cu}) = 8,45 \cdot 10^{22} \text{ 1/см}^3;$$

$$\frac{N}{V}(\text{Sn}) = 14,48 \cdot 10^{22} \text{ 1/см}^3.$$

Энергия Ферми для химических элементов Fe, Cu, Sn приведена в [3, 5] и равна:

$$E_f(\text{Fe}) = 11,16733 \text{ эВ};$$

$$E_f(\text{Cu}) = 7,00 \text{ эВ};$$

$$E_f(\text{Sn}) = 10,03 \text{ эВ}.$$

В изолированном состоянии (при отсутствии контакта металлов) электронный газ металлов характеризуется работой выхода  $W$ , которая для Fe, Cu, Sn, соответственно равна [5]:

$$W(\text{Fe}) = 4,31 \text{ эВ};$$

$$W(\text{Cu}) = 4,4 \text{ эВ};$$

$$W(\text{Sn}) = 4,38 \text{ эВ}.$$

Работа выхода - это энергия, необходимая для удаления электрона с уровня Ферми, расположенного в потенциальной яме металла в точку, расположенную снаружи металла вблизи его поверхности, т. е.

$$W = -E_f. \quad (3)$$

При соединении металлов: Fe с работой выхода  $W(\text{Fe})$  и Sn с работой выхода  $W(\text{Sn})$  таким образом, что электроны могут переходить от одного из них к другому, после установления равновесия электронный газ должен иметь общий химический потенциал. В металлах зависимость между энергией Ферми и химическим потенциалом выражается соотношением [5]:

$$\mu = \left[ 1 - \frac{1}{3} \left( \frac{\pi K_B T}{2E_f} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где  $\mu$  - химический потенциал;  $T$  - абсолютная температура;  $K_B$  - постоянная Больцмана. При комнатных температурах можно принимать  $\mu = E_f$ .

Выравнивание энергетических уровней Ферми происходит следующим образом. Электрон, находясь на более высоком энергетическом уровне Fe,

переходя на более низкий уровень Sn, переносит отрицательный заряд. Следовательно, Sn приобретает электрон, заряжается отрицательно, а Fe, теряя электрон, заряжается положительно. При переходе следующего электрона с Fe на Sn на электрон действует отталкивающая сила, так как металл Sn заряжен отрицательно. Преодолевая отталкивающую силу, электрон переходит из металла Fe на свободный уровень в металле Sn, увеличивая потенциальную энергию в Sn на  $eV$  эВ, где  $e$  – заряд электрона;  $V$  – разность потенциалов на расстоянии  $d$ , где образовалось электрическое поле  $\vec{E}$ , вызванное нескомпенсированным зарядом.

Если обозначить расстояние  $d$ , на котором падает напряжение  $V$ , то при прохождении этого расстояния электроном, приобретенная кинетическая энергия, превращаясь в потенциальную энергию, увеличивает потенциальную энергию в металле Sn на  $eV$ , что можно увидеть из приведенного вычисления:

$$A = e \int_0^d \vec{E} d\vec{r} = e \int_0^d \frac{V}{d} dr = \frac{eV}{d} r \Big|_0^d = \frac{eV}{d} d = eV, \quad (5)$$

где  $A$  – работа по перемещению электрона.

Таким образом, все энергетические уровни металла Sn поднимаются на  $eV$  эВ. Аналогично, электроны, проходя расстояние  $d$ , где действует положительный заряд, в металле Fe ускоряются, уменьшая потенциальную энергию.

Когда уровни Ферми железа, опускаясь вниз, а уровни Ферми олова, поднимаясь вверх, оказываются на одном энергетическом уровне, то в переходе металл Fe – Sn устанавливается равновесие.

При этом контактная разность потенциалов равна [2]:

$$V_K = \frac{1}{e} [W(Sn) - W(Fe)] = V_1 - V_2, \quad (6)$$

где  $V_K$  – разность потенциалов;  $V_1$  и  $V_2$  – потенциалы, соответственно Sn и Fe.

Выравнивание энергетических уровней Ферми выражается соотношением:

$$E_f'(Fe) = E_f'(Sn), \quad (7)$$

а, из соотношения (2) следует, что энергия Ферми зависит от плотности электронов в металлах. Поэтому плотность электронов в железе уменьшается после перехода их в олово, а в олове их плотность увеличивается.

Величина уменьшения энергии Ферми в железе, как и величина увеличения энергии Ферми в олове определяется соотношением:

$$\frac{W(Sn) - W(Fe)}{2} = \frac{eV_K}{2}. \quad (8)$$

Следовательно, уменьшенная энергия Ферми после установления термодинамического равновесия для железа определяется соотношением:

$$E_f'(Fe) = E_f(Fe) - \frac{W(Sn) - W(Fe)}{2}. \quad (9)$$

Увеличенная энергия Ферми для олова имеет вид:

$$E_f'(Sn) = E_f(Sn) + \frac{W(Sn) - W(Fe)}{2}. \quad (10)$$

Так как энергия Ферми зависит от плотности электронов (2), то вычислив по формуле (9)  $E_f'(Fe)$ , находим плотность электронов, переписав соотношение (2) в следующем виде:

$$\left(\frac{N}{V}\right) = 4,542291 \cdot 10^{21} \cdot \sqrt{[E_f'(Fe)]}, \quad (11)$$

где  $\left(\frac{N}{V}\right)$  – плотность электронов в Fe после соединения.

Подставляя численное значение  $E_f'(Fe)$  в (11) получим плотность электронов в железе после соединения:

$$\left(\frac{N}{V}\right)(Fe) = 1,687151 \cdot 10^{23} \text{ 1/см}^3.$$

Количество электронов, перешедшее из Fe в Sn, найдем, вычисляя разность между значениями плотности в Fe до соединения и значением плотности в Fe после соединения с Sn:

$$\Delta n = \frac{N}{V}(Fe) - \left(\frac{N}{V}\right)(Fe) = 1,7 \cdot 10^{23} - 1,687151 \cdot 10^{23} = 7,996 \cdot 10^{20} \text{ 1/см}^3.$$

Уменьшение плотности электронов в Fe после соединения с Sn составляет около 0,5%.

Увеличение плотности в Sn после соединения с Fe равно

$$\left(\frac{N}{V}\right)(Sn) = 14,48 \cdot 10^{22} + 7,996 \cdot 10^{20} = 1,455996 \cdot 10^{23} \text{ 1/см}^3.$$

Энергия Ферми, вычисленная по формулам (9) и (10) после установления термодинамического равновесия равна для металлов Fe и Sn соответственно:

$$E_f'(Fe) = E_f(Fe) - \frac{W(Sn) - W(Fe)}{2} = 11,16733 - \frac{4,38 - 4,31}{2} = 11,13233 \text{ эВ};$$

$$E_f'(Sn) = E_f(Sn) + \frac{W(Sn) - W(Fe)}{2} = 10,03 + \frac{4,38 - 4,31}{2} = 10,065 \text{ эВ}.$$

Располагая данными  $E_f'(Fe)$  и  $E_f'(Sn)$ , вычислим среднее значение кинетической трансляционной энергии для железа и олова, которое согласно [2] определяется по соотношению:

$$E_f m = \frac{3}{5} E_f \quad (12)$$

Тогда:

$$E_f m(Fe) = \frac{3}{5} E_f(Fe) = 6,679398 \text{ эВ};$$

$$E_f m(Sn) = \frac{3}{5} E_f(Sn) = 6,039 \text{ эВ}.$$

Используя соотношение (12), вычисляем трансляционную кинетическую энергию электронов в Fe и Sn до соединения, которая соответственно равна:

$$E_f m(Fe) = 0,6 \times 11,16733 = 6,700398 \text{ эВ}.$$

$$E_f m(Sn) = 0,6 \times 10,03 = 6,018 \text{ эВ}.$$

Чтобы проанализировать уменьшение энергии связи Sn при соединении с Fe, необходимо подставить в уравнение (1) значения  $E_f m(Sn)$  и  $E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}$ , после чего получим уравнение для энергии связи в Sn до соединения с Fe.

Значения энергии связи для химических элементов Fe, Cu, Sn, согласно [3], соответственно равны:

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(Fe) = 4,29 \text{ эВ};$$

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(Cu) = 3,50 \text{ эВ};$$

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(Sn) = 3,12 \text{ эВ}.$$

Уравнение связи (1) для Sn до соединения имеет вид:

$$3,12 = E_{\text{свб. атом.}} - E_a + 6,018. \quad (13)$$

Подставляя данные в уравнение (1) после соединения Sn с Fe, необходимо учесть, что после перетока электронов с Fe в Sn в олове появляется нескомпенсированный заряд (отрицательный), который равномерно поднимает все энергетические уровни вместе с уровнем Ферми на величину  $\frac{W(Sn) - W(Fe)}{2} = 0,35 \text{ эВ}$ .

Кроме того, вследствие увеличения плотности электронов увеличивается средняя кинетическая трансляционная энергия на величину

$$E_f m(Sn) - E_f m(Sn) = 6,039 - 6,018 = 0,021 \text{ эВ}.$$

Поэтому уравнение (1) после соединения Fe и Sn принимает вид:

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}} = E_{\text{свб. атом.}} - E_a + 0,021 + 6,018 + 0,035. \quad (14)$$

Переписывая уравнение (14) получим:

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}} = 3,12 - 0,056 = E_{\text{свб. атом.}} - E_a + 6,018. \quad (15)$$

Таким образом, энергия связи уменьшится и равна  $E \frac{\text{связи}}{\text{атом}} = 3,064 \text{ эВ}$ .

Аналогично анализируем увеличение энергии связи для Fe после соединения с Sn, учитывая, что все энергетические уровни электронов, в том числе и уровень Ферми  $E_f$ , за счет уменьшения потенциальной энергии на  $\frac{W(Sn) - W(Fe)}{2} = 0,35 \text{ эВ}$  и уменьшения кинетической трансляционной энергии на  $6,700398 - 6,679398 = 0,021 \text{ эВ}$ .

Анализируя, подобно анализу уравнений (14) и (15) заключаем, что энергия связи в переходе металл-металл в Fe увеличивается на 0,056 эВ и станет равной:

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}} = 4,29 + 0,056 = 4,346 \text{ эВ}.$$

Таким образом, энергия связи в слое Sn равна:

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}} = 3,12 + 0,016 = 3,136 \text{ эВ}.$$

Энергия связи в переходном слое Cu уменьшается на 0,016 эВ и равна:

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}} = 3,50 - 0,016 = 3,484 \text{ эВ}.$$

При соединении Fe – Cu за счет перетока электронов из Fe в Cu энергетический уровень Ферми поднимется за счет увеличения потенциальной энергии и равен, согласно (10):

$$E_f(Cu) = E_f(Fe) + \frac{W(Cu) - W(Fe)}{2} = 7,00 + \frac{4,4 - 4,31}{2} = 7,045 \text{ эВ}.$$

Средняя кинетическая трансляционная энергия в переходном слое Cu до и после соединения, согласно (12), равна:

$$E_f m(Cu) = 0,6 \times 7,00 = 4,200 \text{ эВ};$$

$$E_f m(Cu) = 0,6 \times 7,045 = 4,227 \text{ эВ}.$$

Следовательно, за счет увеличения кинетической трансляционной энергии происходит уменьшение энергии связи в Cu на  $4,227 - 4,200 = 0,027 \text{ эВ}$ .

Таким образом, энергия связи в Cu уменьшается на  $0,027 + 0,045 = 0,072 \text{ эВ}$  и оказывается равной:

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(Cu) = 3,50 - 0,072 = 3,428 \text{ эВ},$$

а энергия связи в переходном слое железа увеличится на 0,072 эВ.

Тогда:  $E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(\text{Fe}) = 4,29 + 0,072 = 4,362 \text{ эВ}$ .

Если сравнить энергии связи на атом в химических элементах Fe, Cu и Sn, которые согласно [3] равны:

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(\text{Fe}) = 4,29 \text{ эВ};$$

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(\text{Cu}) = 3,50 \text{ эВ};$$

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(\text{Sn}) = 3,12 \text{ эВ},$$

то наименьшая энергия связи на атом приходится на химический элемент Sn.

При соединении элементов Fe и Sn энергия связи в слое Sn уменьшится на 0,056 эВ и становится равной  $E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(\text{Sn}) = 3,064 \text{ эВ}$ .

При соединении элементов по схеме Fe - Cu - Sn энергия связи в элементе переходного слоя Sn увеличивается на 0,016 эВ и становится равной

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(\text{Sn}) = 3,136 \text{ эВ}.$$

Следует отметить, что при этом уменьшится энергия связи в Cu на 0,016 эВ и станет равной  $E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(\text{Cu}) = 3,484 \text{ эВ}$ , но и после этого уменьшения энергия связи на атом в Cu заметно больше чем энергия связи в Sn.

Следовательно, если соединить элементы по схеме Fe - Cu - Sn, то энергия связи в Sn не уменьшается, а немного увеличивается, а если соединить по схеме Fe - Sn, то энергия связи в Sn уменьшается.

Таким образом, самое слабое звено системы соединения (Sn) при соединении металлов по схеме Fe - Sn приводит к снижению прочности Sn и упрочнению Fe, а при соединении по схеме Fe - Cu - Sn самое слабое звено Sn упрочняется.

### Выводы

Теоретическими исследованиями установлено, что самое слабое звено системы соединения (Sn) при соединении металлов по схеме Fe - Sn приводит к снижению прочности Sn и упрочнению Fe, а при соединении по схеме Fe - Cu - Sn самое слабое звено Sn упрочняется.

Список литературы: 1. Гуляев А.П. Металловедение.- М.: Металлургия, 1986.- 544с. 2. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. - М.: Мир, 1968.- 558 с. 3. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела.- М.: Наука, 1978.-790 с. 4. Борн М. Атомная физика. - М.: Мир, 1970.- 488 с. 5. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела.- М.: Мир, 1979.- 399 с.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК621.757.001.57

А.Г. ЯСЕВ, К.Г. МЕЖЕННАЯ

## ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ВАЛОВ ГИДРОМАШИН НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Two cases of grinding of billows of hydraulic machines are analyzed in the article; basic reliability indexes of this method are expected. The rational parameters of tuning of the technological system are certain.

В условиях реальных производственных процессов возникает необходимость рассмотреть в качестве объекта теории надежности метод механической обработки [1]. Повышение надежности процесса механической обработки с целью стабильного обеспечения заданной точности обрабатываемых деталей является актуальным вопросом, поскольку надежность определяет эффективность использования станков и автоматических линий и обуславливает показатели производительности и экономичности технологических процессов.

Целью данной статьи является применение аппарата показателей теории надежности при исследовании процесса шлифования валов гидромашин в условиях реальной технологической системы на предприятии-изготовителе, а также определение рациональных параметров настройки технологической системы для обеспечения заданного уровня точности обработки.

Исследование проведено для вала двигателя ДС0.02 (вал I) и вала насоса ДЦН80 (вал II).

Для вала I были собраны статистические данные операции шлифования поверхности  $\varnothing 8\text{f}9 \left( \begin{smallmatrix} -0.013 \\ -0.049 \end{smallmatrix} \right)$ ,  $R_a$  1,25 мкм, и установлено, что поле рассеивания выходит за пределы поля допуска (возможно возникновение брака на операции).

Таблица 1 – Параметры распределений полученных размеров при шлифовании валов

№ п/п	Закон распределения	Математическое ожидание $a$ , мм	Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , мкм	Ассиметрия $\alpha$
Вал I	Нормальный	7,961	8,9698	-0,414
Вал II	t-распределение	17,90	1,9326	0,33

При исследовании шлифования поверхности  $\varnothing 18\text{g}7 \left( \begin{smallmatrix} -0.006 \\ -0.018 \end{smallmatrix} \right)$ ,  $R_a$  0,32 мкм вала II было установлено, что поле рассеивания находится в пределах поля допуска.